

# 小麦–玉米轮作体系不同旋耕和深耕管理对潮土微生物量碳氮与酶活性的影响

朱长伟, 龙潜, 董士刚, 石柯, 姜桂英\*, 李小磊, 张崇洋,

刘芳, 申凤敏, 刘世亮\*

(河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450002)

**摘要:** 【目的】通过研究黄淮平原潮土区两年不同轮耕模式下土壤微生物量碳氮、酶活性的差异和变化特征, 为该地区选择适宜的耕作制度提供理论依据。【方法】2016—2018年采用裂区设计进行田间小麦–玉米轮作体系下的轮耕试验。主处理为小麦季旋耕(RT)和深耕(DT), 3个副处理为玉米季免耕(NT)、行间深松(SBR)、行内深松(SIR), 共6个处理。2017、2018年玉米收获后, 每10 cm一个层次, 测定了0—50 cm土层土壤有机质、全氮、速效养分、微生物量碳(SMBC)、微生物量氮(SMBN)和脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶活性。【结果】各处理土壤有机质、全氮、速效养分、SMBC、SMBN及酶活性均随土层深度的增加而降低, 40—50 cm土层不受耕作方式的影响。小麦季深耕和玉米季深松对表层土壤有机质和全氮影响不明显, 但显著提高了深层土壤有机质和全氮含量。小麦季旋耕显著增加了玉米季0—10 cm土层中速效养分含量, 而小麦季深耕条件下的DT-SBR和DT-SIR处理则显著增加了20—40 cm土层中的速效养分含量。在0—20 cm土层, 小麦季旋耕条件下的RT-NT、RT-SBR和RT-SIR处理的SMBC明显高于小麦季深耕条件下的DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理, 但在20—40 cm土层, SMBC和SMBN均表现为小麦季深耕处理显著高于旋耕处理, 且以DT-SIR处理SMBC(67.99 mg/kg)和SMBN(45.96 mg/kg)最高。小麦季深耕处理提高了深层(30—40 cm)土壤微生物量氮/全氮值, 但降低了表层(0—20 cm)土壤中的微生物量。玉米季深松处理(RT-SBR、RT-SIR、DT-SBR和DT-SIR)较免耕处理(RT-NT和DT-NT)均提高了土壤酶活性, 其中, 在0—20 cm土层, RT-SBR和RT-SIR处理土壤脲酶活、蔗糖酶和中性磷酸酶活性较高; 而DT-SBR和DT-SIR处理则提高了深层(20—40 cm)土壤中这三种酶的活性。【结论】在本试验期内, 小麦季旋耕–玉米季深松处理(RT-SBR和RT-SIR)能明显提高0—10 cm土壤速效养分含量、0—20 cm土壤微生物量碳含量, 而小麦季深耕–玉米季深松处理(DT-SBR和DT-SIR)则提升了20—40 cm土层土壤有机质、全氮、速效养分、微生物量碳和氮含量; 小麦季深耕处理提高了深层(30—40 cm)微生物量氮/全氮比, 但降低了表层(0—20 cm)土壤微生物量。

**关键词:** 小麦–玉米轮作; 潮土; 耕作; 土壤微生物量; 土壤酶活性

## Effects of rotary and deep tillage modes on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities in fluvo-aquic soil under wheat–maize rotation system

ZHU Chang-wei, LONG Qian, DONG Shi-gang, SHI Ke, JIANG Gui-ying\*, LI Xiao-lei, ZHANG Chong-yang,

LIU Fang, SHEN Feng-min, LIU Shi-liang\*

(College of Resources and Environment, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** 【Objective】The effects of rotation tillage on soil microbial biomass carbon (SMBC), soil microbial biomass nitrogen (SMBN) and enzyme activities were studied in wheat–maize rotation system in

收稿日期: 2019-08-30 接受日期: 2020-01-15

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目(2016YFD0300803); 国家自然科学基金项目(41401327); 河南省科技厅基金项目(192102110161); 河南省教育厅基金项目(20A210024)。

联系方式: 朱长伟 E-mail: 1937975636@qq.com

\* 通信作者 姜桂英 E-mail: jgy9090@126.com; 刘世亮 E-mail: shlliu70@163.com

fluvo-aquic soil in Huang-Huai Plain, aiming for selection of suitable tillage system. **【 Methods 】** Field experiments with split plot design were conducted in 2017 and 2018. The two main treatments were rotary tillage (RT) and deep tillage (DT) in wheat season, three sub-treatments were no-tillage (NT), inter-row subsoiling (SBR) and in-row subsoiling (STR) in maize season, making totally six treatments. The contents of soil organic matter, total nitrogen, available nutrients, SMBC and SMBN, and the activities of urease, invertase and neutral phosphatase in different soil layers were measured. **【 Results 】** All the indexes decreased with soil depth in the two years but the indexes were not affected by the tillage modes in 40–50 cm layer. The deep tillage in wheat season and subsoiling in maize season did not significantly increased organic matter and total nitrogen contents in surface layer, but did in deeper layers. Rotary tillage in wheat season increased available nutrient contents in 0–10 cm layer, while DT-SBR and DT-SIR treatment increased those in 20–40 cm soil layer. In 0–20 cm layer, the SMBC in RT treatments were significantly higher than those in DT ones, but in 20–40 cm layer, both SMBC and SMBN were significant higher in DT treatments than in RT ones, and with the highest SMBC (67.99 mg/kg) and highest SMBN (45.96 mg/kg) in DT-SIR. DT increased the ratio of SMBN/total N in 30–40 cm layer, but decreased the microbial entropy in surface layer (0–20 cm). Subsoiling in maize season brought higher soil enzyme activities than no-tillage did. The soil urease, invertase and neutral phosphatase activities were higher under RT-SBR and RT-SIR in 0–20 cm layer, while they were significantly increased under DT-SBR and DT-SIR in 20–40 cm layer. **【 Conclusions 】** In the fluvo-aquic soil area of Huang-Huai Plain, during the experimental period, rotary tillage in wheat season and subsoiling in maize season could increase available nutrient contents in 0–10 cm layer and microbial biomass carbon in 0–20 cm layer, while deep tillage in wheat season and subsoiling in maize season could increase content of organic matter, total N, available nutrient, microbial biomass carbon in 20–40 cm layer. Deep tillage in wheat season also could improve the ratio of MBSN/total N and decrease the microbial entropy in 0–20 cm layer.

**Key words:** wheat-maize rotation; fluvo-aquic soil; tillage; soil microbial biomass; soil enzyme activity

农田耕作是改善土壤耕层结构, 调节土壤生态环境和养分状况的重要管理措施<sup>[1]</sup>。不同耕作方式对土壤的扰动程度不同, 会直接影响土壤的理化性状, 同时改变土壤微生物栖息微环境。土壤微生物是土壤中养分循环和物质转化的驱动者, 土壤微生物群落结构组成及活性变化是衡量土壤质量、维持土壤肥力和作物生产力的一个重要指标<sup>[2]</sup>。土壤酶活性是土壤生物学活性的总体现, 它可表征土壤肥力的综合特征、变化状况以及土壤养分的转化进程, 可作为评价土壤肥力水平的指标<sup>[3]</sup>。而且这些土壤生物学指标对短期的耕作响应迅速<sup>[4]</sup>。因此, 研究在不同耕作方式下土壤微生物量碳氮及土壤酶活性的变化, 对评价、筛选适宜的耕作方式具有重要意义。

农田耕作模式及其组合使用类型较多, 不同耕作模式对土壤的扰动程度的差异直接影响土壤的理化性状, 改变土壤微生物栖息微环境, 从而引起根际微生物区系及酶活性的变化<sup>[5]</sup>。高强度耕作会降低土壤微生物量碳和氮, 如翻耕处理土壤微生物的数量比免耕处理低<sup>[6]</sup>, 但适宜的土壤紧实度可明显增加土壤微生物量碳、氮及土壤酶活性<sup>[7]</sup>。不同区域免耕

对土壤微生物量的增加效应存在差异<sup>[8]</sup>, 研究结果也有较大差异。据报道, 免耕相对传统耕作对表层土壤微生物量增加幅度在 17%<sup>[9]</sup>到 98%<sup>[10]</sup>之间, 多数报道称土壤微生物量在免耕系统中较高<sup>[11]</sup>, 而在其他不同耕作措施系统下没有显著差异<sup>[12]</sup>。另一方面, 耕作方式差异也造成不同土层土壤生物学指标的差异。刘水等<sup>[13]</sup>研究表明, 玉米季深松耕、免耕和翻耕明显增加了 0—10 cm 土层土壤微生物量碳和土壤微生物活性; Pandey 等的研究表明, 相对旋耕, 深耕可促进微生物的繁殖, 提高土壤酶活性<sup>[14]</sup>, 而刘淑梅等<sup>[15]</sup>研究发现, 小麦季深耕模式下表层土壤 (0—20 cm) 的微生物量碳与旋耕差异不显著, 但微生物量氮显著降低, 比旋耕下降 33.0%。刘红杰等<sup>[16]</sup>也发现深耕增加土壤微生物的数量, 提高土壤磷酸酶和蔗糖酶活性, 但对土壤脲酶活性有负面影响。刘秀梅等<sup>[17]</sup>的研究表明, 棕壤免耕土壤表层蔗糖酶、脲酶活性显著高于翻耕。大量研究表明, 秸秆还田能增加土壤酶活性, 但结合不同耕作后对土壤酶活性的影响有区域性差异<sup>[18-20]</sup>, 其中, 免耕比少耕和翻耕显著提高表层土壤酶活性<sup>[21]</sup>。但也有研究发现免耕、少耕对表层

土壤酶活性影响差异不显著<sup>[22]</sup>。土壤微生物的生长离不开土壤养分的存在, 耕作措施也可通过影响土壤养分间接影响土壤微生物, 研究发现深松、深松与免耕轮耕模式有利于改善耕层结构和提高土壤养分<sup>[23]</sup>, 唐先亮等<sup>[24]</sup>研究还发现, 深松可提高土壤透气性, 促进有机质分解, 增加土壤中有效养分含量。

黄淮平原潮土区是我国粮食主产区, 目前主要采用小麦播前旋耕和玉米免耕直播的耕作模式, 这种长期单一的耕作方式导致了土壤耕层变浅、蓄水保墒能力的降低<sup>[25]</sup>, 土壤物理结构及质量下降。目前大多研究是集中于玉米免耕条件下进行的小麦不同耕作方式的比较, 缺乏玉米季不同耕作方式间的比较, 不能确定小麦-玉米轮作体系下最优的轮耕组合。前人关于耕作方式对土壤微生物量碳氮及酶活性的研究结果也存在一些争议。因此, 本研究基于黄淮平原潮土区小麦-玉米轮作体系, 通过年内小麦季和玉米季耕作模式组合, 探索土壤微生物量碳氮和土壤酶活性的变化特征, 为该地区选择合适的耕作方式提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地点

试验于 2016—2018 年在河南省原阳县河南农业大学科教园区 (N35°19'、E113°50') 进行。该地区地属暖温带大陆性季风气候, 年均温度为 14.5℃, 年均降水量 615 mm, 年均日照时数为 2324 h。试验地土壤类型为典型砂质潮土, 试验前 0—20 cm 土层基本理化性质为: 有机质 17.3 g/kg、全氮 1.25 g/kg、碱解氮 109 mg/kg、有效磷 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 21.6 mg/kg、速效钾 (K<sub>2</sub>O) 108 mg/kg、pH 7.2。

### 1.2 试验设计

试验采用裂区设计, 在前茬作物秸秆全量还田条件下, 在小麦季设旋耕和深耕 2 个主处理, 玉米季设免耕播种、行间深松、行内深松 3 个副处理, 共 6 个处理。每个处理 3 次重复, 小区面积 68.2 m<sup>2</sup> (5.5 m × 12.4 m)。各处理具体情况如表 1 所示。

小麦播种前将前季玉米秸秆全量还田, 旋耕深度为 13—15 cm, 深耕深度为 28—30 cm, 小麦品种是‘郑麦 369’, 播量 232.5 kg/hm<sup>2</sup>; 基肥施用 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为 20-16-16 的小麦专用肥 750 kg/hm<sup>2</sup> (即 N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 150、120、120 kg/hm<sup>2</sup>), 追肥为尿素 150 kg/hm<sup>2</sup> (即 N 69 kg/hm<sup>2</sup>)。

玉米播种前将前季小麦秸秆全量还田, 深松深度 35 cm 左右, 深松行距 61.3 cm 左右, 用玉米播种机进行种肥同播, 株距为 21.9 cm。玉米品种为‘浚单 29’, 密度 67500 株/hm<sup>2</sup>; 玉米季基施 N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O 为 28-10-12 的玉米专用肥 750 kg/hm<sup>2</sup> (N、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、K<sub>2</sub>O 分别为 210、75、90 kg/hm<sup>2</sup>)。

耕作采用机械进行, 玉米播种前使用深松机进行田间深松作业 (35 cm 左右), 然后基肥肥料随播种机种肥同播。其中, 行间深松是玉米播种机将玉米播种在两深松沟的中间, 而行内深松是玉米播种机直接将玉米播种在深松沟内。

### 1.3 取样与测定

于 2017 年和 2018 年 10 月玉米成熟期, 按五点取样法, 分别采取 0—50 cm 土壤样品, 每 10 cm 取一个样。样品分为两部分, 一部分为新鲜土样, 去除可见植物残体和石块, 测定土壤微生物量碳、氮; 另一部分为风干土样, 去除可见石块和根系, 风干过 0.85 mm 和 0.25 mm 筛, 测定土壤有机碳、全氮、速效养分及酶活性。土壤全氮采用凯氏定氮

表 1 小麦、玉米季耕作处理

Table 1 Details of tillage in wheat and maize season of each treatment

小麦季 Wheat season	玉米季 Maize season	处理代码 Treatment code
旋耕 (RT) Rotary tillage	免耕, 种肥同播 No-tillage (NT)	RT-NT
	行间深松, 两深松沟中间播种玉米 Subsoiling 35 cm, seeding between the ditches (SBR)	RT-SBR
	行内深松, 深松沟内播种玉米 Subsoiling 35 cm, seeding inside the ditches (SIR)	RT-SIR
深耕 (DT) Deep tillage	免耕, 种肥同播 No-tillage (NT)	DT-NT
	行间深松, 两深松沟中间播种玉米 Subsoiling 35 cm, seeding between the ditches (SBR)	DT-SBR
	行内深松, 深松沟内播种玉米 Subsoiling 35 cm, seeding inside the ditches (SIR)	DT-SIR

注 (Note): 在小麦季, 玉米秸秆全量还田, 旋耕 13—15 cm 或深耕 28—30 cm。Before winter wheat sowing, all straw of maize was returned to the field with rotary tilling to a depth of 13–15 cm or deep ploughing to a depth of 28–30 cm.

仪法, 有机碳采用重铬酸钾外加热容量法, 碱解氮采用碱解扩散法, 有效磷采用钒钼蓝比色法, 速效钾采用  $\text{NH}_4\text{OAc}$  浸提火焰光度计法<sup>[26]</sup>测定; 土壤微生物量碳、氮采用氯仿熏蒸— $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提后, 用 TOC 仪 (利曼 US17192017) 测定<sup>[27]</sup>, 土壤微生物量碳 (SMBC,  $\text{mg}/\text{kg}$ ) =  $\text{EC} \times 0.38$ , 土壤微生物量氮 (SMBN,  $\text{mg}/\text{kg}$ ) =  $\text{EN} \times 0.45$  (其中 EC 和 EN 分别为熏蒸和未熏蒸土壤  $\text{K}_2\text{SO}_4$  浸提液中有机碳、全氮含量的差值, 0.38 和 0.45 分别为土壤微生物量碳和氮的系数)。土壤脲酶活性测定采用苯酚钠比色法, 蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法, 中性磷酸酶活性采用 4-氨基安替比林比色法<sup>[28]</sup>。

#### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2007 进行整理数据; 用 SPSS 22.0 统计分析软件对数据进行方差及相关性 ( $P < 0.05$ ) 分析; 使用 OriginPro 8.5 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同耕作模式对土壤有机质和全氮的影响

图 1 所示, 两年各处理土壤有机质和全氮均随

土层深度的增加而下降。在两年中, 处理间有机质含量差异均随土层加深而缩小, 耕作方式带来的差异主要在 0—30 cm 土层, 以 0—10 cm 土层的差异最大。小麦季旋耕条件下, 两年玉米季免耕处理 (RT-NT) 的 0—30 cm 土壤有机质含量低于或显著低于 RT-SBR 和 RT-SIR 处理, 后两个处理间无显著差异; 小麦季深耕条件下, 2017 年玉米季免耕 (DT-NT) 处理有机质含量在 0—20 cm 土层显著高于 DT-SBR 和 DT-SIR 处理, 在 20—30 cm 土层差异不显著, 而 2018 年只在 0—10 cm 土层差异显著。受施肥的影响, 各处理土壤全氮含量 0—10 cm 土层均高于 20 cm 以下土层, 处理间没有明显规律性。在试验期内, 小麦季旋耕条件下, 玉米季行间深松和行内深松对土壤有机质影响不显著, 但均高于免耕处理; 而小麦季深耕条件下, 在第一年玉米季行间深松和行内深松比免耕不同程度地降低了土壤表层有机质和全氮含量, 在第二年降低幅度缩小。

### 2.2 不同耕作模式对土壤速效养分的影响

图 2 所示, 各处理土壤速效养分含量在两季均随土层加深而下降, 且处理间差异随土层深度增加

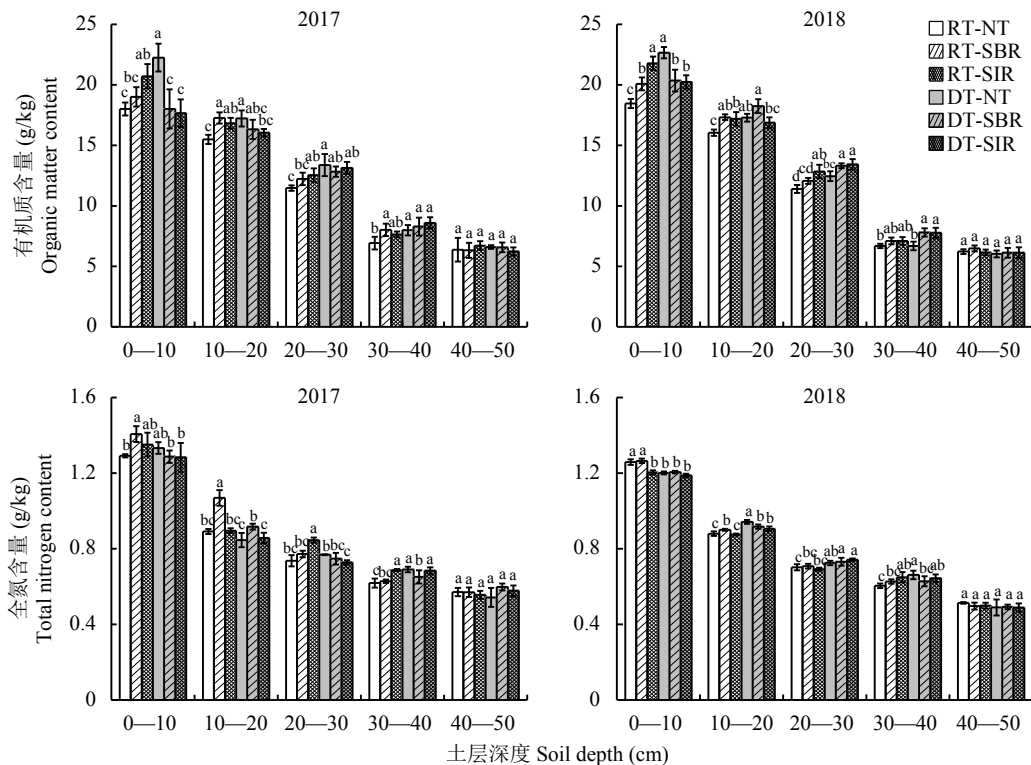


图 1 不同耕作方式下 2017 年和 2018 年各土层土壤有机质和全氮含量

Fig. 1 Soil organic matter and total nitrogen contents in different soil layers under different tillage modes in 2017 and 2018

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars show significant differences among different tillage modes ( $P < 0.05$ ).]

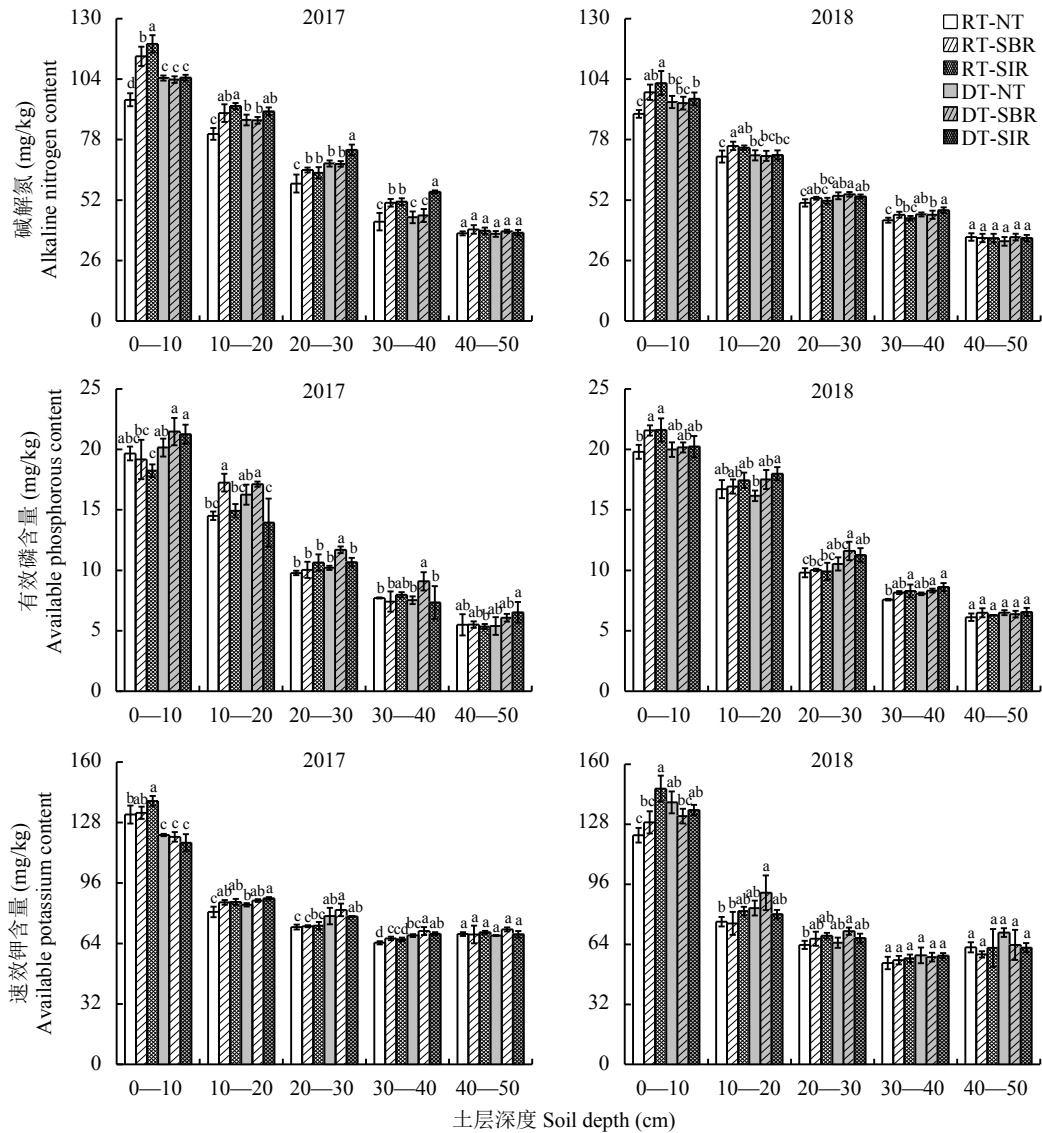


图 2 不同耕作方式下 2017 年和 2018 年各土层土壤速效养分含量

Fig. 2 Soil available nutrient contents in different soil layers under different tillage modes in 2017 and 2018

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars show significant differences among different tillage modes ( $P < 0.05$ ).]

而缩小, 在 40—50 cm 处理间差异基本不显著。2017 和 2018 两年结果显示, 小麦季旋耕结合玉米季深松 (RT-SBR 和 RT-SIR) 处理 0—30 cm 土壤碱解氮含量显著高于免耕; 小麦季深耕和玉米季免耕、深耕三个处理间差异不显著。

在 2017 年, 小麦季旋耕或者深耕, 玉米季行间深松在 0—30 cm 土层土壤有效磷含量总的趋势高于行内深松和免耕; 在 2018 年, 小麦深耕条件下, 玉米行内深松可显著提高 30—40 cm 土层有效磷含量 ( $P < 0.05$ )。在 2017 年, 小麦季旋耕后玉米季三个处理 0—10 cm 土层的土壤速效钾含量显著高于小麦季深耕后, 但这个差异在 2018 年 (试验的第二年) 就不

再显现。而且在 10—40 cm, 土壤速效钾含量表现为相反趋势, 即小麦季旋耕土壤的速效钾含量低于小麦季深耕土壤的趋势。

总体来说, 小麦旋耕处理 (特别是 RT-SIR 处理) 能明显增加玉米季 0—10 cm 土层中的速效养分含量, 而小麦季深耕后玉米季深松 (DT-SBR 和 DT-SIR) 则能显著增加 20—40 cm 土层中的速效养分含量。

### 2.3 不同耕作模式对土壤微生物量碳的影响

图 3 显示, 各耕作模式土壤微生物量碳 (SMBC) 在两季均随土层加深而下降, 且处理间差异随土层加深而缩小, 在 40—50 cm 基本表现为处理间差异

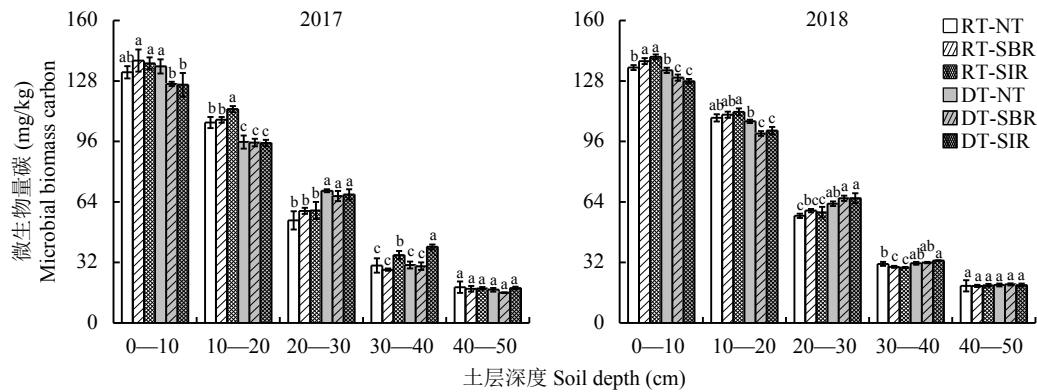


图3 不同耕作模式下2017年和2018年各土层土壤微生物量碳

Fig. 3 Soil microbial biomass carbon contents in different soil layers under different tillage modes in 2017 and 2018

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同耕作模式间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars show significant differences among different tillage modes ( $P < 0.05$ .)

不显著。2017年,小麦季旋耕条件下,RT-SIR处理的SMBC在0—20 cm土层均表现较高,含量在113.13—137.35 mg/kg之间;小麦季深耕条件下,20—30 cm土层DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理SMBC含量显著高于旋耕处理(RT-NT、RT-SBR和RT-SIR),30—40 cm土层DT-SIR处理的SMBC最高,为40.25 mg/kg。在2018年,小麦季深耕条件下,DT-SBR、DT-SIR处理显著降低0—20 cm土层中的SMBC;相对RT-NT处理,DT-SIR处理显著提高20—40 cm土层中的SMBC含量,最高提高了32.51%。总体来说,两年周期中,0—20 cm土层,小麦季旋耕条件下各处理的SMBC含量明显高于小麦季深耕处理,但在20—40 cm土层则相反;其中20—40 cm土层中DT-SIR处理SMBC含量显著高于其他处理。

#### 2.4 不同耕作模式对土壤微生物量氮的影响

图4所示,各处理土壤微生物量氮(SMBN)在两年均随土层加深而下降,40—50 cm土层处理间差异不显著。2017年,0—20 cm土层均以RT-SBR、DT-SIR处理高于其他处理,0—10 cm土层SMBN含量最高,分别为64.17 mg/kg、64.65 mg/kg;20—30 cm土层,RT-SBR、DT-SBR处理显著高于RT-NT,30—40 cm土层,小麦季深耕条件下DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理的SMBN显著高于旋耕处理(RT-NT、RT-SBR和RT-SIR)。在2018年,小麦季旋耕条件下,RT-SBR、RT-SIR处理0—30 cm土层的SMBN含量显著高于RT-NT;而小麦季深耕条件下,DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理相对旋耕处理(RT-NT、RT-SBR和RT-SIR)显著提高了

20—40 cm土层中的SMBN含量。总体来说,在试验期内,0—20 cm土层SMBN变化的规律性不明显,但均以对照处理RT-NT的SMBN最低;在20—40 cm土层基本表现为小麦季深耕条件下的DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理的SMBN含量显著高于旋耕条件下的RT-NT、RT-SBR和RT-SIR处理,其中以DT-SIR处理最优。

微生物熵( $C_{mic}/C_{org}$ )是土壤微生物量碳(SMBC)与土壤总有机碳(SOC)的比值,是评价土壤有机碳损失或获得的有效指标。由图5可知,在2017年,小麦季旋耕条件下0—20 cm土层的RT-NT、RT-SBR和RT-SIR处理的 $C_{mic}/C_{org}$ 明显高于小麦季深耕条件下的DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理,且基本均以RT-NT处理显著高于其他处理,最高为1.6%;20—40 cm土层,DT-SBR处理显著高于其他处理。在2018年,0—20 cm土层,各处理 $C_{mic}/C_{org}$ 变化与2017年类似;20—30 cm土层,RT-SIR处理显著低于其他处理;30—40 cm,处理间差异规律性不明显;40—50 cm土层处理间差异不显著。总体来说,在试验期内,小麦季深耕条件下DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理降低了0—20 cm土层中的 $C_{mic}/C_{org}$ 。

图6所示,两季土壤的土壤微生物量氮/土壤全氮( $N_{mic}/N_{total}$ )均呈先增高后降低的趋势,在10—20 cm土层中达到最大值。2017年,0—20 cm土层,基本以小麦季深耕条件下的DT-NT、DT-SBR和DT-SIR处理高于小麦季旋耕条件下的RT-NT、RT-SBR和RT-SIR处理,其中DT-SIR处理显著高于其他处理,最高为6.4%;20—30 cm土层,DT-SBR处理的 $N_{mic}/N_{total}$ 显著高于RT-NT和RT-SIR处理,为

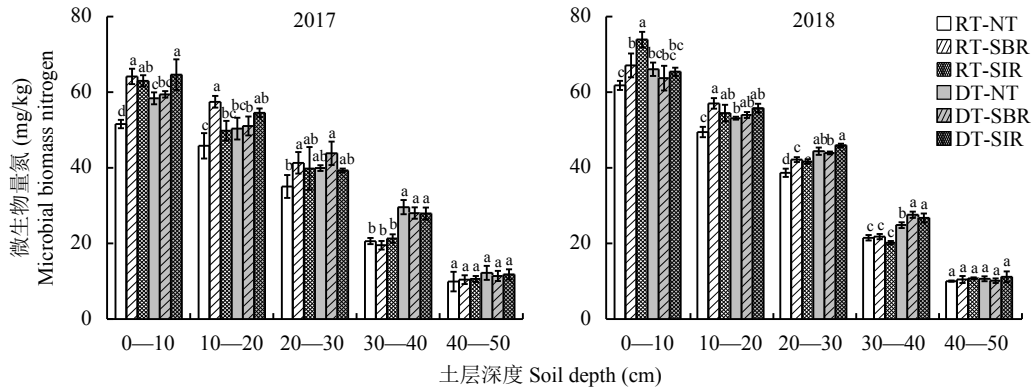


图 4 不同耕作模式下 2017 年和 2018 年各土层土壤微生物量氮

Fig. 4 Soil microbial biomass nitrogen contents in different soil layers under different tillage modes in 2017 and 2018

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同耕作模式间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars show significant differences among different tillage modes ( $P < 0.05$ .)

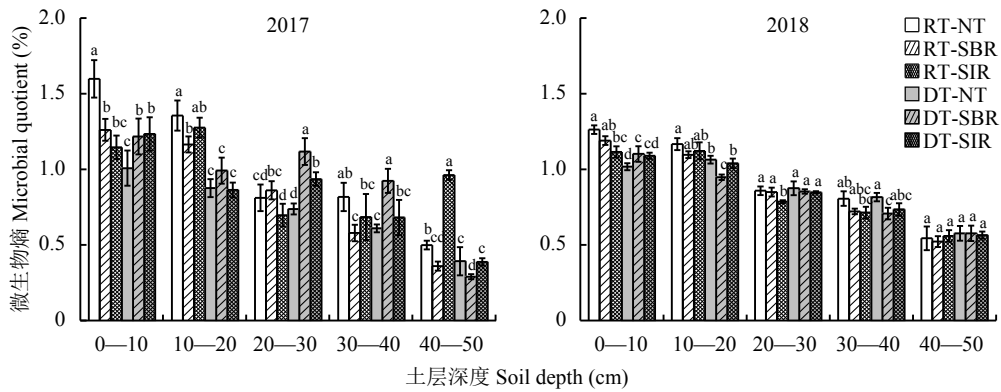


图 5 不同耕作模式下 2017 年和 2018 年各土层土壤微生物熵

Fig. 5 Soil microbial quotient ( $C_{mic}/C_{org}$ ) in different soil layers under different tillage modes in 2017 and 2018

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同耕作模式间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars show significant differences among different tillage modes ( $P < 0.05$ .)

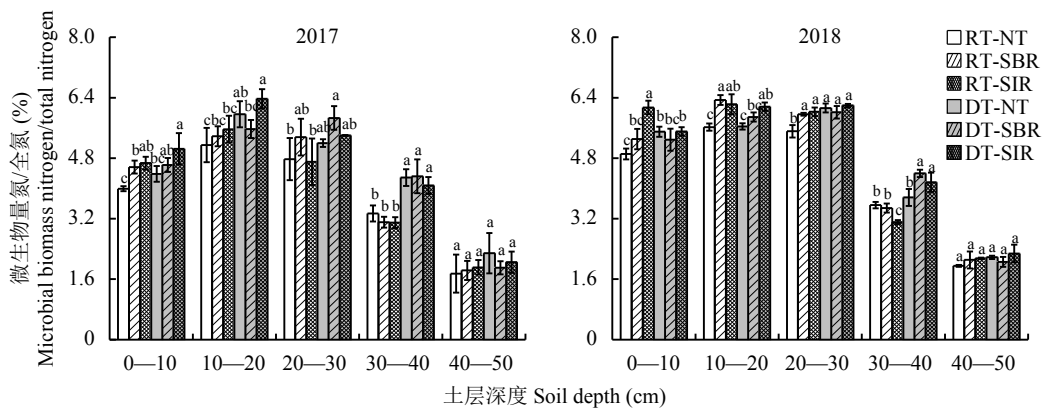


图 6 不同耕作模式下 2017 年和 2018 年各土层土壤微生物量氮/全氮

Fig. 6 Soil microbial biomass nitrogen/total nitrogen in different soil layers under different tillage modes in 2017 and 2018

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同耕作模式间差异显著 ( $P < 0.05$ )

Different small letters above the bars show significant differences among different tillage modes ( $P < 0.05$ .)

5.9%; 30—40 cm 土层与 0—20 cm 类似, 深耕处理显著高于旋耕处理。2018 年, 在 0—20 cm 土层,

$N_{mic}/N_{total}$  变化规律不明显; 30—40 cm 土层, DT-SBR、DT-SIR 处理显著高于其他处理。总体来说,

2017 年, 0—40 cm 土层基本以小麦季深耕处理的  $N_{mic}/N_{total}$  高于旋耕处理, 其中 DT-SIR 处理在 0—20 cm 表现较优; 而在 2018 年, 30—40 cm 土层小麦季深耕处理对  $N_{mic}/N_{total}$  的影响较明显。

## 2.5 不同耕作模式对土壤酶活性的影响

图 7 显示, 各处理土壤脲酶活性在两季均随土层加深而下降; 其中 2017 年各处理脲酶活性均高于 2018 年。2017 年, 0—40 cm 土层, 总体以玉米季深松处理 (RT-SBR、RT-SIR、DT-SBR 和 DT-SIR) 的脲酶活性高于免耕处理 (RT-NT), 其中 RT-SIR 处理的脲酶活性在 0—10 cm 土层最高, 为 2.94 [ $NH_3-N$  mg/(g·24 h)]。2018 年, 0—20 cm 土层, 均以玉米季

深松处理 (RT-SBR、RT-SIR、DT-SBR 和 DT-SIR) 的脲酶活性显著高于免耕处理 (RT-NT 和 DT-NT); 20—40 cm 土层小麦季旋耕处理之间脲酶活性差异不显著, 但小麦季深耕处理中仍以配合玉米季深松处理 (DT-SBR 和 DT-SIR) 的脲酶活性显著高于免耕处理 (DT-NT)。总体来说, 在试验期内, 玉米季深松处理相对免耕处理能显著提高 0—40 cm 土层土壤脲酶活性, 且以小麦季深耕—玉米季深松处理的效果更优。

各处理土壤蔗糖酶活性在两季均随土层加深而下降; 其中 2017 年各处理在 0—20 cm 土层的蔗糖酶活性高于 2018 年, 在 40—50 cm 基本表现为处理间差异不显著。在 2017 年, 0—20 cm 土层, 基本表

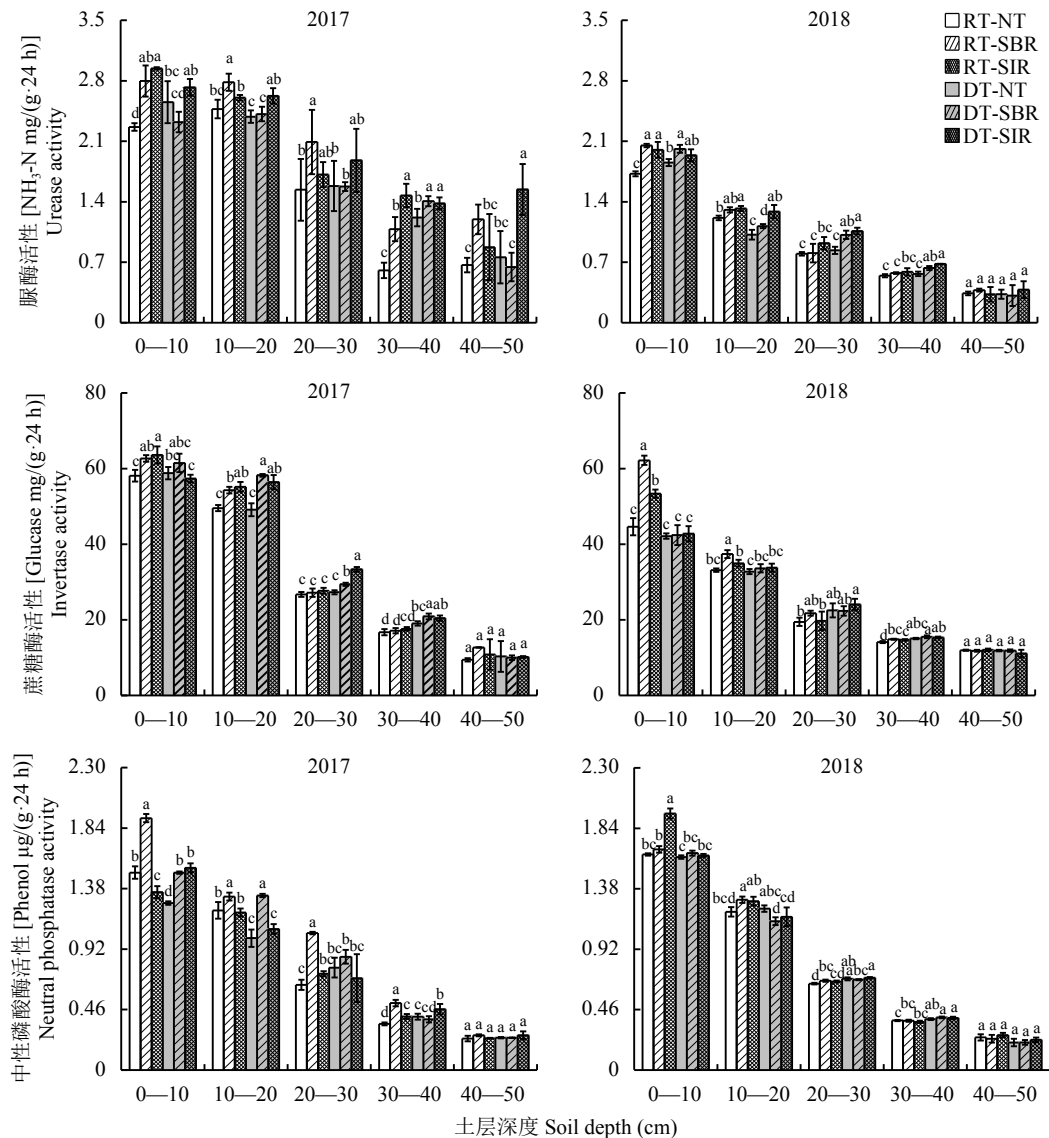


图 7 不同耕作模式下 2017 年和 2018 年各土层土壤酶活性

Fig. 7 Enzyme activities in different soil layers under different tillage modes in 2017 and 2018

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示同一土层不同耕作模式间差异显著 ( $P < 0.05$ )]

Different small letters above the bars show significant differences among different tillage modes ( $P < 0.05$ ).



现为玉米季深松处理 (RT-SBR、RT-SIR、DT-SBR 和 DT-SIR) 的蔗糖酶活性显著高于免耕处理 (RT-NT 和 DT-NT), 其中 0—10 cm 土层的 RT-SBR、RT-SIR 处理蔗糖酶活性较高, 分别为 62.70、63.62 [Glucose  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot 24\text{ h})$ ]; 20—40 cm 土层, 小麦季旋耕条件下处理间的蔗糖酶活性差异不显著, 而小麦季深耕条件下处理中仍表现为配合玉米季深松的处理 (DT-SBR 和 DT-SIR) 显著高于免耕处理 (DT-NT)。在 2018 年, 0—20 cm 土层, 小麦季旋耕配合玉米季深松处理 (RT-SBR 和 RT-SIR) 的蔗糖酶活性显著高于玉米季免耕处理 (RT-NT), 其中 RT-SBR 处理的蔗糖酶活性, 在 0—10 cm 土层最高为 62.19 [Glucose  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot 24\text{ h})$ ]; 在 20—40 cm 土层, 小麦季旋耕条件下的 RT-NT、RT-SBR、RT-SIR 三处理间及小麦季深耕条件下的 DT-NT、DT-SBR、DT-SIR 三处理间的蔗糖酶活性差异不显著, 但总体以小麦季深耕处理高于旋耕处理。总体来说, 在两年试验期中, 玉米季深松处理较免耕处理能明显提高不同土层蔗糖酶活性, 其中 0—20 cm 土层小麦季旋耕-玉米季深松处理的效果优于小麦季深耕处理, 而 20—40 cm 土层则是小麦季深耕-玉米季深松处理的效果最优。

各处理土壤中性磷酸酶活性在两季均随土层加深而下降, 在 40—50 cm 处理间差异不显著。在 2017 年, 0—40 cm 土层, 基本以 RT-SBR 处理的中性磷酸酶活性显著高于免耕处理 (RT-NT), 且在

0—10 cm 土层其土壤磷酸酶活性最高, 为 1.92 [Phenol  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot 24\text{ h})$ ]。在 2018 年, 0—10 cm 土层, RT-SIR 处理土壤中性磷酸酶活性显著高于其他处理, 为 1.95 [Phenol  $\mu\text{g}/(\text{g}\cdot 24\text{ h})$ ], 10—20 cm 土层, 小麦季旋耕玉米季深松的处理 (RT-SBR 和 RT-SIR) 显著高于免耕处理 (RT-NT); 20—40 cm 土层, 小麦季旋耕处理间的中性磷酸酶活性差异不显著, 而小麦季深耕处理中仍表现为配合玉米季深松的处理 (DT-SBR 和 DT-SIR) 显著高于免耕处理 (DT-NT)。总体来说, 在 2017 年, RT-SBR 处理有利于提升 0—40 cm 土层土壤中性磷酸酶活性, 而小麦季深耕-玉米季深松处理 (DT-SBR、DT-SIR) 在两年中均有利于提升深层 (20—40 cm) 土壤中性磷酸酶活性。

## 2.6 不同处理下各指标相关性

由表 2 可知, 2017 和 2018 年玉米季的有机质、全氮、速效养分及微生物量碳氮、酶活性间均呈极显著相关关系, 且各指标间同样呈极显著相关。

## 3 讨论

土壤有机质是土壤的重要组成成分, 是表征土壤肥力的重要指标<sup>[29]</sup>。氮素是作物生长发育所必需的大量营养元素, 其丰缺影响农作物的生长发育及产量的形成<sup>[30]</sup>。土壤速效养分含量是衡量土壤肥沃程度的重要指标, 也是影响植物生长发育的关键因子。前人研究发现, 土壤有机碳、全氮含量随着土层深度的增加均呈降低的趋势<sup>[31]</sup>; 张洋等<sup>[32]</sup>研究认为, 在

表 2 两年各指标相关性分析

Table 2 Correlation analysis of all indicators in the two-year maize season

项目 Item	有机质 OM	全氮 Total N	碱解氮 Alkal. N	有效磷 Avail. P	速效钾 Avail. K	SMBC	SMBN	脲酶 Urease	蔗糖酶 Invertase	中性磷酸酶 NP
有机质 OM	1									
全氮 Total N	0.874**	1								
碱解氮 Alkal. N	0.894**	0.946**	1							
有效磷 Avail. P	0.732**	0.819**	0.886**	1						
速效钾 Avail. K	0.798**	0.901**	0.871**	0.714**	1					
SMBC	0.933**	0.944**	0.946**	0.791**	0.846**	1				
SMBN	0.928**	0.893**	0.913**	0.725**	0.778**	0.956**	1			
脲酶 Urease	0.739**	0.791**	0.873**	0.922**	0.720**	0.774**	0.744**	1		
蔗糖酶 Invertase	0.852**	0.906**	0.968**	0.916**	0.814**	0.922**	0.871**	0.892**	1	
中性磷酸酶 NP	0.905**	0.936**	0.943**	0.758**	0.853**	0.976**	0.948**	0.769**	0.905**	1

注 (Note): NP—Neutral phosphatase; \*\*— $P < 0.01$  (双侧 Bilateral).

东北黑土区免耕加深松的轮耕模式能够有效增加犁底层以下的土壤氮磷钾和有机质含量,且与常规耕作相比深耕处理能使耕层下部土壤有机质含量显著增加<sup>[33]</sup>。本研究中,各处理有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量均随着土壤深度的增加呈下降趋势,0—20 cm 土层,小麦季深耕—玉米季免耕处理的有机质含量显著高于其他处理,这主要是因为深耕对土壤扰动较大,加速表层土壤有机物质的矿化,不利于上层土壤养分的积累<sup>[34]</sup>。小麦季旋耕—玉米季行内深松显著增加 0—10 cm 土层中的碱解氮、有效磷和速效钾含量,这与唐先亮等<sup>[24]</sup>的研究结果相同。小麦季深耕—玉米季深松的处理 (DT-SBR 和 DT-SIR) 能显著增加 20—40 cm 土层中的有机质、速效养分含量及 30—40 cm 土层中的土壤全氮含量,可能是因为深松能够打破犁底层,同时由于不翻动土壤,不会引起土壤养分的大量流失,再加上覆盖秸秆的分解,能够有效增加土壤养分<sup>[35]</sup>。

土壤微生物量碳、氮作为土壤微生物体内所有有机碳、有机氮及无机氮的总和,参与土壤养分循环和土壤有机质的转化,是评价土壤微生物活性的重要指标,能够灵敏、及时、准确地反映土壤质量的变化状况<sup>[36]</sup>及不同耕作措施导致的土壤微生物数量和活性差异性<sup>[37]</sup>。影响 SMBC 和 SMBN 含量的因素有很多,其中耕作制度是重要的影响因素之一。前人研究表明,随着土层深度的增加,土壤孔隙度变小,通透性减弱,含氧量降低,土壤微生物量减少<sup>[38]</sup>。王万宁等<sup>[39]</sup>的研究发现,深松处理可降低 0—40 cm 土层土壤容重,提高孔隙度;而且,深松降低了土壤紧实度,可以实现促进玉米根系下扎的目的<sup>[40]</sup>。Pandey 等<sup>[14]</sup>研究发现,深耕处理相比于旋耕能促进土壤微生物的繁殖,增加土壤微生物量。而 Kuldip 等<sup>[6]</sup>的研究则认为,免耕相比翻耕更能增加土壤微生物的数量。本研究中,0—50 cm 土层各处理 SMBC、SMBN 均随着土壤深度的增加呈下降趋势,小麦季旋耕—玉米季行内深松处理提升了 0—30 cm 土层的 SMBN 和 0—20 cm 土层土壤  $N_{mic}/N_{total}$ ,这与 Zuber 等<sup>[11]</sup>的研究结果不同,主要可能是因为作物的残余物在表层累积,导致了土壤表层微生物活性及生物量的增加<sup>[41]</sup>。小麦季深耕配合玉米季深松处理 (DT-SBR 和 DT-SIR) 相较于旋耕处理 (RT-NT、RT-SBR 和 RT-SIR) 能显著增加 20—40 cm 土层中 SMBC 和 SMBN,这与 Kuldip 等<sup>[6]</sup>的研究结果不同,可能是因为深耕会增加土壤孔隙度,有利于土壤气体的交换,改善土壤的微生态环境,促进好氧

性微生物的活化和矿物质的分解,有益于土壤微生物生长,进而增加了下层 SMBC 和 SMBN 的含量<sup>[42]</sup>。小麦季深耕—玉米季行内深松能显著增加 10—40 cm 土层中 SMBN 和 20—40 cm 土层中 SMBC。这主要是因为深耕的基础上再进行玉米季行内深松,相对于行间深松,会增加下层土壤和植株根系的通透性,改善土壤环境,有利于玉米根系的下扎<sup>[40]</sup>及微生物的生长,进而增加下层土壤的微生物量。小麦季深耕的 3 个处理 (DT-NT、DT-SBR 和 DT-SIR) 降低了 0—20 cm 土层中的土壤微生物熵 ( $C_{mic}/C_{org}$ ),而  $C_{mic}/C_{org}$  的高低,通常意味着土壤中可供土壤微生物利用的有机碳含量的多少,本试验发现小麦季深耕的 3 个处理降低了表层中的  $C_{mic}/C_{org}$ ,这可能是因为深耕作业一方面促进农田上下层土壤的交换,另一方面促进了上层土壤有机碳的矿化,进而降低了表层土壤微生物熵。

土壤酶具有催化土壤中生化反应的作用,其活性大小可用来表征各种生物化学过程的强度及方向<sup>[28]</sup>,作为敏感指标来表征土壤肥力及土壤质量的变化。土壤酶的活性随着土壤剖面深度的增加而降低,其在剖面上的分布与微生物的分布一致<sup>[43]</sup>。王芸等<sup>[44]</sup>采用大田试验研究表明,深松可显著提高土壤脲酶、蔗糖酶活性。而且田间深松会促进土壤微粒的团聚,改善土壤微生物环境,增加土壤有机碳含量,加快土壤微生物生长,从而提升脲酶、蔗糖酶、中性磷酸酶活性<sup>[45]</sup>;且深松能增强土壤与空气间的氧气交换,在氧气及秸秆的作用下会增强土壤微生物分泌脲酶及相关参与氮循环的酶的能力<sup>[46]</sup>,而 Ekenler 和 Tabatabaie<sup>[21]</sup>的研究则表明相比于少耕和翻耕,免耕处理可显著提高表层土壤的酶活性。本试验研究表明,小麦季旋耕—玉米季深松能显著增加 0—20 cm 土层中的酶活性,且行间深松的效果好于行内深松。这主要是因为行内深松的处理,玉米根系间土壤的孔隙度较大,不利于土壤水分的保持,而土壤湿度对酶活性有很大的影响,当土壤湿度较大时,酶活性会上升<sup>[28]</sup>。小麦季深耕配合玉米季深松的处理 (DT-SBR 和 DT-SIR) 相较于免耕处理 (RT-NT) 能显著增加 20—40 cm 土层中土壤酶活性,这与 Ekenler 和 Tabatabaie<sup>[21]</sup>的研究结果不同,主要是因为深耕处理会使地表的残茬及作物秸秆翻入土中,促其腐烂成肥,增加了下层土壤的腐殖质含量,有利于土壤微生物的生长,进而提高耕层下部土壤的酶活性<sup>[47]</sup>。土壤酶活性主要集中在 0—20 cm 土层中,20 cm 以下活性较小,说明 0—20 cm 是土壤微

生物的主要活动区域,这是由于土壤表层累积了较多的腐殖质,土壤养分与通气状况较好,使得微生物生长旺盛,代谢活跃,呼吸强度大,所以表层的土壤酶活性较高<sup>[48]</sup>。两季的微生物量碳氮、酶活性及土壤养分间均呈极显著相关关系。这主要是因为土壤养分是土壤微生物生存的基础,土壤微生物量表征着土壤微生物的数量,而土壤酶是微生物及植物根系的活性产物,因此土壤养分、土壤微生物量和酶活性之间存在着密切的关系。且两季的土壤脲酶、蔗糖酶和中性磷酸酶活性之间均呈极显著相关关系,这可能是因为3种土壤酶之间存在某一相同的底物,当其中任意一种酶与该底物结合后,会释放出一种或多种信息物质,激活其他酶的活性<sup>[49]</sup>。

## 4 结论

小麦季旋耕-玉米季深松处理(RT-SBR和RT-SIR)能明显提高0—10 cm土层土壤速效养分含量、0—20 cm土层土壤微生物量碳含量,而小麦季深耕-玉米季深松处理(DT-SBR和DT-SIR)则提升了20—40 cm土层土壤有机质、全氮、速效养分、微生物量碳和氮含量;小麦季深耕处理提高了深层(30—40 cm)微生物量氮/全氮比,但降低了表层(0—20 cm)土壤微生物熵。土壤酶活性对玉米季深松处理响应敏感,玉米季深松处理较免耕处理均提高了土壤酶活性,其中小麦季旋耕配合玉米季深松处理提高了表层(0—20 cm)脲酶和蔗糖酶活性,而小麦季深耕配合玉米季深松处理则提高了深层(20—40 cm)土壤脲酶、蔗糖酶及中性磷酸酶活性。

## 参 考 文 献:

- [1] Dikgwatlhe S B, Chen Z D, Lal R, *et al.* Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat-maize cropping system in the North China Plain[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 144(4): 110–118.
- [2] 黄召存, 陈娇, 熊瑛, 等. 保护性耕作对蚕豆根际土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(3): 79–85.  
Huang Z C, Chen J, Xiong Y, *et al.* Effects of conservation tillage on soil microbes and enzyme activity in rhizosphere of broad bean[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2018, 36(3): 79–85.
- [3] 曹慧, 孙辉, 杨浩, 等. 土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J]. *应用与环境生物学报*, 2003, 9(1): 105–109.  
Cao H, Sun H, Yang H, *et al.* A review: soil enzyme activity and its indication for soil quality[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental*, 2003, 9(1): 105–109.
- [4] Roldan A, Salinas-garcia J R, Alguacil M M, *et al.* Soil enzyme activities suggest advantages of conservation tillage practices in sorghum cultivation under subtropical conditions[J]. *Geoderma*, 2005, 129(3–4): 178–185.
- [5] 徐莹莹, 王俊河, 刘玉涛, 等. 耕作与秸秆还田方式对连作玉米田间根际微生物及酶活性的影响[J]. *黑龙江农业科学*, 2018, (7): 1–3.  
Xu Y Y, Wang J H, Liu Y T, *et al.* Effects of tillage and straw returning on microorganism and enzyme activity in continuous cropping corn field[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2018, (7): 1–3.
- [6] Kuldip G, Ayyanadar A, Biman K D. Tillage effects on soil microbial biomass in a rainfed agricultural system of northeast India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 109(2): 68–74.
- [7] 陈喜凤, 杨粉团, 姜晓莉, 等. 深松对玉米早衰的调控作用[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(12): 82–86.  
Chen X F, Yang F T, Jiang X I, *et al.* Regulation of subsoiling on premature senescence of corn[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(12): 82–86.
- [8] 肖美佳, 张晴雯, 董月群, 等. 免耕对土壤微生物量碳影响的Meta分析[J]. *核农学报*, 2019, 33(4): 833–839.  
Xiao M J, Zhang Q W, Dong Y Q, *et al.* Meta-analysis to assess impact of no-tillage on soil microbial biomass carbon[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(4): 833–839.
- [9] Das A, Lal R, Patel D P, *et al.* Effects of tillage and biomass on soil quality and productivity of lowland rice cultivation by mall scale farmers in North Eastern India[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 143: 50–58.
- [10] Balota E L, Colozzi Filho A, Andrade D S, *et al.* Long-term tillage and crop rotation effects on microbial biomass and C and N mineralization in a Brazilian Oxisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2004, 77: 137–145.
- [11] Zuber S M, Villamil, María B. Meta-analysis approach to assess effect of tillage on microbial biomass and enzyme activities[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 97: 176–187.
- [12] Gennaro L A, Souza Z M, Weill M, *et al.* Soil physical and microbiological attributes cultivated with the common bean under two management systems[J]. *Revista Ciencia Agronomica*, 2014, 45: 641–649.
- [13] 刘水. 不同耕作方式对农田夏玉米土壤微生物的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(34): 91–93, 110.  
Liu S. Effects of different tillage methods on soil microbes in farmland summer maize[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(34): 91–93, 110.
- [14] Pandey D, Agrawal M, Bohra J S. Effects of conventional tillage and no tillage permutations on extracellular soil enzyme activities and microbial biomass under rice cultivation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136: 51–60.
- [15] 刘淑梅, 孙武, 张瑜, 等. 小麦季不同耕作方式对砂姜黑土玉米农田土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. *玉米科学*, 2018, 26(1): 103–107.  
Liu S M, Sun W, Zhang Y, *et al.* Effects of wheat tillage managements on soil microbial characters and soil enzyme activities in summer maize season in shajiang black Soil[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2018, 26(1): 103–107.
- [16] 刘红杰, 刁向银, 刘朝科, 等. 深翻耕和连作对植烟土壤养分及其生物活性的影响[J]. *福建农业学报*, 2011, 26(2): 298–303.

- Liu H J, Xi X Y, Liu C K, *et al.* Effect of deep plowing and continuous cropping on nutrient level and biological activity in Soil for tobacco plantation[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 26(2): 298–303.
- [17] 刘秀梅, 李琪, 梁文举, 等. 潮棕壤免耕农田土壤酶活性的动态变化[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(12): 2347–2351.
- Liu X M, Li Q, Liang W J, *et al.* Dynamics of aquatic brown soil enzyme activities under no-tillage[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2347–2351.
- [18] Melero S, Lopez-Garrido R, Murillo J M, *et al.* Conservation tillage: short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 292–298.
- [19] Qin S P, He X H, Hu C S, *et al.* Responses of soil chemical and microbial indicators to conservational tillage versus traditional tillage in the North China Plain[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, 46(3/4): 243–247.
- [20] Tang H M, Xiao X P, Tang W G, *et al.* Effects of winter cover crops residue returning on soil enzyme activities and soil microbial community in double cropping rice fields[J]. *PLoS One*, 2014, 9(6): e100443.
- [21] Ekenler M, Tabatabai M A. Tillage and residue management effects on  $\beta$ -glucosaminidase activity in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(6): 871–874.
- [22] López-Garrido R, Madejón E, León-Camacho M, *et al.* Reduced tillage as an alternative to no-tillage under Mediterranean conditions: A case study[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 140: 40–47.
- [23] 王平, 陈娟, 谢成俊, 等. 轮耕条件下土壤改良及春玉米增产增收效果研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(5): 59–67.
- Wang P, Chen J, Xie C J, *et al.* Effects of rotation tillage on soil improvement and increasing yield and benefit of spring maize[J]. *Agricultural Research in The Arid Areas*, 2018, 36(5): 59–67.
- [24] 唐先亮, 魏甲彬, 周玲红, 等. 耕作方式对稻田土壤微生物量碳氮的动态影响[J]. *作物研究*, 2016, 30(3): 282–287.
- Tang X L, Wei J B, Zhou L H, *et al.* The dynamic effect of different tillage methods on soil microbial carbon and nitrogen in rice paddy[J]. *Crop Research*, 2016, 30(3): 282–287.
- [25] 赵亚丽, 薛志伟, 郭海斌, 等. 耕作方式与秸秆还田对冬小麦-夏玉米耗水特性和水分利用效率的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(17): 3359–3371.
- Zhao Y L, Xue Z W, Guo H B, *et al.* Effects of tillage and straw returning on water consumption characteristics and water use efficiency in the winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(17): 3359–3371.
- [26] 鲍士旦. 土壤农化分析 (第3版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- Bao S D. Soil agro-chemical analysis (The 3rd edition)[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008.
- [27] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- Li Z G, Luo Y M, Teng Y. Soil and environmental microorganism research method[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [28] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986. 260–346.
- Guan S Y. Soil enzyme and its research method[M]. Beijing: Agricultural Publishing Press, 1986. 260–346.
- [29] 徐国鑫, 王子芳, 高明, 等. 秸秆与生物炭还田对土壤团聚体及固碳特征的影响[J]. *环境科学*, 2018, 39(1): 355–362.
- Xu G X, Wang Z F, Gao M, *et al.* Effects of straw and biochar return in soil on soil aggregate and carbon sequestration[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 355–362.
- [30] 徐国伟, 吴长付, 刘辉, 等. 秸秆还田与氮肥管理对水稻养分吸收的影响[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(7): 191–195.
- Xu G W, Wu C F, Liu H, *et al.* Effects of straw residue return and nitrogen management on nutrient absorption of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2007, 23(7): 191–195.
- [31] 宋丽萍, 罗珠珠, 李玲玲, 等. 首茬作物轮作模式对土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2016, 24(1): 27–35.
- Song L P, Luo Z Z, Li L L, *et al.* Effects of lucerne-crop rotation patterns on soil aggregate stability and soil organic carbon[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(1): 27–35.
- [32] 张洋, 王鸿斌. 不同耕作模式对黑土区土壤理化性质及玉米生长发育的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(18): 58–64.
- Zhang Y, Wang H B. Effects of different tillage modes on soil physical and chemical properties and maize growth and development in black soil regions[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(18): 58–64.
- [33] Zhao X, Xue J F, Zhang X Q, *et al.* Stratification and storage of soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage practices in the north China plain[J]. *PLoS One*, 2015, 10(6): 1–14.
- [34] Krzic M, Newman R F, Broersma K. Plant species diversity and soil quality in harvested and grazed boreal aspen stands of northeastern British Columbia[J]. *Forest Ecology and Management*, 2003, 182(1/3): 315–325.
- [35] Bengtsson G, Bengtson P, Mansson K F. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1): 143–154.
- [36] Lupwayi N Z, Rice W A, Clayton G W. Soil microbial diversity and community structure under wheat was influenced by tillage and crop rotation[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(13): 1733–1741.
- [37] Bending G D, Turner M K, Rayns F, *et al.* Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(11): 1785–1792.
- [38] Brevik E, Fentton T, Moran L. Effect of soil compaction on organic carbon amounts and distribution, South-Central Iowa[J]. *Environmental Pollution*, 2002, 116(3): S137–S141.
- [39] 王万宁, 强小嫫, 刘浩, 等. 麦前深松对夏玉米土壤物理性状和生长特性的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(6): 229–236.
- Wang W N, Qiang X M, Liu H, *et al.* Effects of subsoiling before sowing of winter wheat on soil physical properties and growth characteristics of summer maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(6): 229–236.
- [40] 张瑞富, 杨恒山, 高聚林, 等. 深松对春玉米根系形态特征和生理特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(5): 78–84.
- Zhang R F, Yang H S, Gao J L, *et al.* Effect of subsoiling on root

- morphological and physiological characteristics of spring maize[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(5): 78-84.
- [41] 张洁, 姚宇卿, 金珂, 等. 保护性耕作对坡耕地土壤微生物量碳、氮的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 126-129.  
Zhang J, Yao Y Q, Jin K, *et al.* Change of SMBC and SMBN under conservation tillage on sloping dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 126-129.
- [42] 梁金凤, 齐庆振, 贾小红, 等. 不同耕作方式对土壤性质与玉米生长的影响研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 945-950.  
Liang J F, Qi Q Z, Jia X H, *et al.* Effects of different tillage managements on soil properties and corn growth[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 945-950.
- [43] 高惠民. 农业土壤管理[M]. 北京: 科学出版社, 1988. 37-42.  
Gao H M. *Agricultural soil management*[M]. Beijing: Science Press, 1988. 37-42.
- [44] 王芸, 韩宾, 史忠强, 等. 保护性耕作对土壤微生物特性及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(4): 120-122.  
Wang Y, Han B, Shi Z Q, *et al.* Effects of conservation tillage on soil microbial characters and soil enzyme activities[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20(4): 120-122.
- [45] 黄华乾, 王金叶, 凌大炯, 等. 不同土地利用方式下土壤过氧化氢酶活性与土壤化学性质的关系研究-以雷州半岛为例[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(6): 2412-2416.  
Huang H Q, Wang J Y, Ling D J, *et al.* Study on relationship between soil catalase activity and soil chemical properties under different land use patterns - take Leizhou Peninsula for example[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2013, 26(6): 2412-2416.
- [46] 王俊华, 尹睿, 张华勇, 等. 长期定位施肥对农田土壤酶活性及其相关因素的影响[J]. *生态环境学报*, 2007, 16(1): 191-196.  
Wang J H, Yin R, Zhang H Y, *et al.* Changes in soil enzyme activities, microbial biomass, and soil nutrition status in response to fertilization regimes in a long-term field experiment[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2007, 16(1): 191-196.
- [47] 冀保毅. 深耕与秸秆还田的土壤改良效果及其作物增产效应研究[D]. 郑州: 河南农业大学博士学位论文, 2013. 56-61.  
Ji B Y. *Research on the effect of deep tillage and straw retained improve soil quality and enhance the yield of crop*[D]. Zhengzhou: PhD Dissertation of Henan Agricultural University, 2013. 56-61.
- [48] 汪娟. 土壤微生物特性对不同耕作方式的响应[D]. 兰州: 甘肃农业大学硕士学位论文, 2009.  
Wang J. *The response of soil microbial properties to different tillages*[D]. Lanzhou: MS Thesis of Gansu Agricultural University, 2009.
- [49] 熊明彪, 雷孝章, 田应兵, 等. 长期施肥对紫色土酶活的影响[J]. *工程科学与技术*, 2003, 35(4): 60-63.  
Xiong M B, Lei X Z, Tian Y B, *et al.* Effects of long-term application of fertilizer on purple soil enzymatic activities[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2003, 35(4): 60-63.